

GEOELEKTRICKÁ DOKUMENTÁCIA NENASÝTENEJ ZÓNY
GEOELECTRIC DOCUMENTATION OF NONSATURATED ZONE

Abstract

In paper is discussed of possibilities and limitation of electric resistivity documentation of nonsaturated zone. Those is presented on characterisation at different places in soil with shallow and deeper underground water table and in mixture of rock and soil environment.

Key words: nonsaturated zone, electric resistivity

Úvod

Je veľa prieskumov horninového prostredia, ktoré sú orientované na zistenie jeho obrazu do malých hĺbok (2 – 10 m). Do tejto kategórie patria hlavne úlohy riešené pre inžiniersku geológiu, environmentalistiku, archeológiu a iné.

Špecifikom plytkých geofyzikálnych prieskumov je fakt, že horninové prostredie v tomto intervale hĺbok obsahuje často hladinu podzemnej vody. Vyšetrovaný priestor je teda rozdelený minimálne na dve vrstvy: hornú, nad hladinou podzemnej vody a na dolnú, pod hladinou podzemnej vody. Tento významný faktor je nutné zohľadniť pri plánovaní prieskumu a hlavne pri interpretácii nameraných výsledkov.

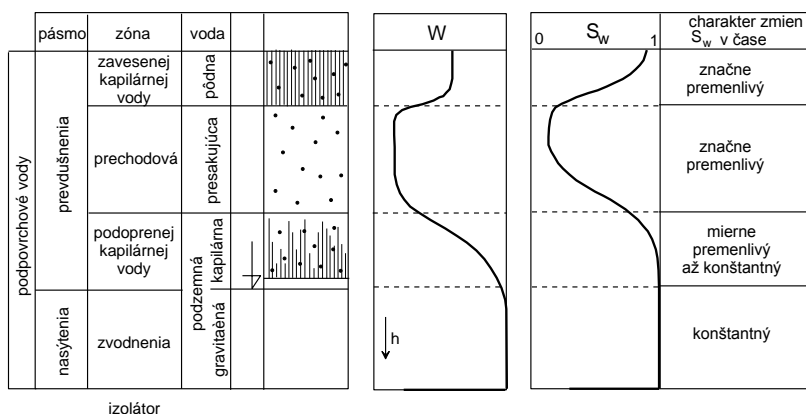
V tomto príspevku sa zaoberáme problematikou skutočnosti existencie tzv. nenasýtenej zóny, t.j. vrstvy horninového prostredia nad hladinou podzemnej vody a jej prejavu, resp. vplyvom na výsledky odporových meraní, realizovaných s cieľom charakterizovať plytké horninové prostredie (OP, VES, ERT).

Nenasýtená zóna

V príslušnej literatúre (napr. Mareš a kol., 1983) sa nenasýtená zóna charakterizuje špecifickým rozložením vlhkosti vo vertikálnom smere. Ako vidieť z obr.1, pri povrchu zeme je prítomná vrstva tzv. zavesenej kapilárnej vody (pôdna voda), ktorej prítomnosť a hrúbka v danom čase závisí na momentálnom stave zrážok (pretože týmto je utváraná) a na type pôdnej vrstvy a jej vegetačnom kryte. Obsah vody a vlhkosti v tejto vrstve je veľmi premenlivý. V smere do hĺbky nasleduje tzv. prechodná vrstva, do ktorej sa zrážková voda dostane iba zriedka a iba za určitých podmienok, priaznivých pre jej prietok a v čase výdatných zrážok. Vlhkosť v tejto vrstve môže byť v čase zrážok menšia ako vo vrstve zavesenej kapilárnej vody a v čase sucha väčšia ako vo vrstve nad ňou. Okrem toho môže prechodná zóna obsahovať lokálne nepriepustné polohy (ily), na ktorých sa môže vytvoriť vrstva vysunutej kapilárnej obruby. Obsah vlhkosti v tejto prechodnej vrstve je značne premenlivý. Ďalej do hĺbky nad hladinou podzemnej vody je ďalšia vrstva zvýšeného obsahu vlhkosti – vrstva podoprenej kapilárnej vody. Je to vlhkosť pochádzajúca z podzemnej vody, ktorá kapilárnymi silami v pórovom priestore vystúpila nahor. Jej hrúbka závisí na priemere pórov – čím sú tenšie, tým je hrubšia (v sprašiach boli pozorované hrúbky až do 20 m).

¹ RNDr., CSc., Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Mlynská dolina, Bratislava, Slovensko, rozimant@fns.uniba.sk

² Doc., RNDr., CSc., Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Mlynská dolina, Bratislava, Slovensko, gajdos@fns.uniba.sk



Obr.1 Zónovanie a rozdelenie vlhkosti v nenasýtenej zóne (spracované podľa Mareš a kol., 1983). W – zmena vlhkosti s hĺbkou, S_w – zmena stupňa nasýtenia pórov vodou.

Pod kapilárnou obrubou bezprostredne nasleduje horninové prostredie, ktorého pórový priestor je úplne zaplnený podzemnou vodou.

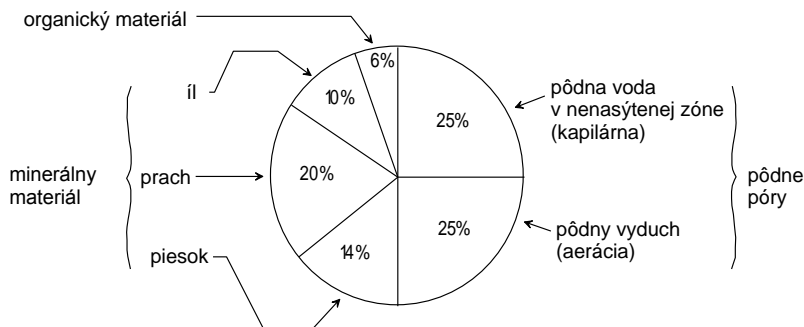
Otázka, ktorú chceme v ďalšom diskutovať znie: ako sa tento model prejavuje vo vertikálnom rozložení rezistivity (merného elektrického odporu)?

Pri odporových meraniach na horninovom prostredí zisťujeme množstvo a pohyblivosť nosičov elektrického náboja vo vyšetrovanom priestore. Keďže sa spravidla pohybujeme v prostredí s iónovou vodivosťou, množstvo voľných nosičov elektrického náboja je dané množstvom vlhkosti v nenasýtenej zóne, pretože voľné nosiče elektrického náboja sú tu zastúpené iónmi vo vode vytvárajúcej vlhkosť v pórovom priestore. Pohyblivosť týchto iónov závisí na spojitosti vlhkostnej blany, na priechodnosti pórov a na povrchovej vodivosti vytváranej prítomnosťou ílov v materiáli nenasýtenej, ale aj nasýtenej vrstvy.

Z uvedeného je zjavné, že priestorové rozloženie rezistivity odráža materiálové zmeny (zrornosť sedimentu, percentuálny obsah ílových minerálov, percentuálny obsah vlhkosti a jej mineralizácia) a zmeny v stave zhutnenia sedimentu (miera pórovitosti). Na základe posúdenia týchto faktorov je možné analyzovať napr. ERT obrazy a pokúsiť sa interpretovať príčiny diferenciácie rezistivity vo vyšetrovanom horninovom prostredí.

Materiál nenasýtenej zóny

Približný obraz o materiáli nenasýtenej zóny je možné získať z grafu uvedenom McNeilom (McNeil, J.D., 1980) (obr.2). I keď sa týka hlavne pôdneho horizontu, dá sa po miernej úprave použiť aj pre ostatnú časť nenasýtenej vrstvy – ubúda organický materiál, mení sa objem pórov, pomer vlhkosti a vzduchu a zrejme zmeny prebiehajú aj v pomere troch minerálnych zložiek ku ktorým sa miestami pridáva aj kamenitá (štrková) zložka.



Obr.2 Objemové zloženie hlinitej pôdy (upravené podľa McNeil, J.D., 1980).

Prítomnosť vody v pórovom priestore nenasýtenej zóny je priestorovo a časovo veľmi premenná. Táto premenlivosť je závislá na pórovitosti (Φ) a jej zmenách v priestore nenasýtenej zóny. Okrem percentuálneho zastúpenia pórov (čo podľa obr.2 môže dosahovať aj 50%) je z hľadiska jej pohybu a nepriamo aj elektrickej vodivosti dôležitá priechodnosť pórov a ich prierez. Tieto môžu významne ovplyvniť transport vlhkosti v nenasýtenej zóne a spôsobiť jej rezistívne štruktúrovanie.

Okrem priestorovej premenlivosti je významná aj časová premenlivosť prítomnosti vody v pórovom priestore. Táto časová premenlivosť závisí predovšetkým na aktivite zrážok a na podmienkach pre výpar tej časti zrážkovej vody, ktorá zostáva predovšetkým vo vrstve kapilárnej zavesenej vody. Keďže množstvo vody v pórovom priestore sa mení, na jeho hodnotenie sa používa parameter nasýtenie – S_w (jeho hodnota sa mení v intervale 0 – 1). Z obr.1 vidieť, že vyčleňujúcim znakom nenasýtenej zóny je to, že v nej $S_w < 1$. Teda k premenlivosti pórovitosti pristupuje aj premenlivosť nasýtenia pórov, ktoré je v nenasýtenej zóne vždy menšie ako 100%.

Ako sme uviedli, nosiče náboja sú v bežnom horninovom prostredí (bez prítomnosti kovových materiálov) prítomné takmer výlučne (ak neuvažujeme umelé vodiče) v podzemnej vode vo forme iónov. Množstvo iónov v tejto vode je závislé na tom, koľko solí je vo vode rozpustených – jej mineralizáciou (M). Pre potreby výpočtu rezistivity sa rôzne druhy solí prepočítavajú na ekvivalentnú NaCl ($\text{mg/l} = 1 \text{ ppm}$). Mineralizácia pitnej vody sa pohybuje okolo 500 ppm, morská voda má mineralizáciu okolo 35.000 ppm a voda z vodovodu okolo 311 ppm (podľa údajov Univerzity Lausanne). Vo výpočtoch rezistivity sa s mineralizáciou pórovej vody kalkuluje cez rezistivitu (alebo vodivosť) pórovej vody (ρ_w , resp. γ_w).

Archieho zákon

Veľá autorov sa pokúšalo výpočtom odhadnúť rezistivitu horninového prostredia budovaného zeminami. Vzhľadom na heterogenitu takéhoto prostredia sa presný výpočet v reálnych podmienkach realizovať nedá, pretože prakticky nie je možné presne určiť podiel jednotlivých zložiek vo vyšetrovanom objeme (navyše tento objem sa pri bežných meraniach nedá presne vymedziť) ani presne stanoviť ich hodnoty vstupujúce do výpočtu. Preto je aspoň snaha minimalizovať počet premenných (jednoduché homogénne prostredia s jednoduchou geometriou a pod.). Základnú podobu vzťahu, ktorú akceptuje prakticky celá odborná verejnosť navrhol Archie v roku 1942 a jeho podoba pre nenasýtenú zónu v rozšírenej podobe pre nespevnené alebo spevnené materiály má tvar

$$\gamma_d = A\gamma_w\Phi^m S_w^n + \gamma_c$$

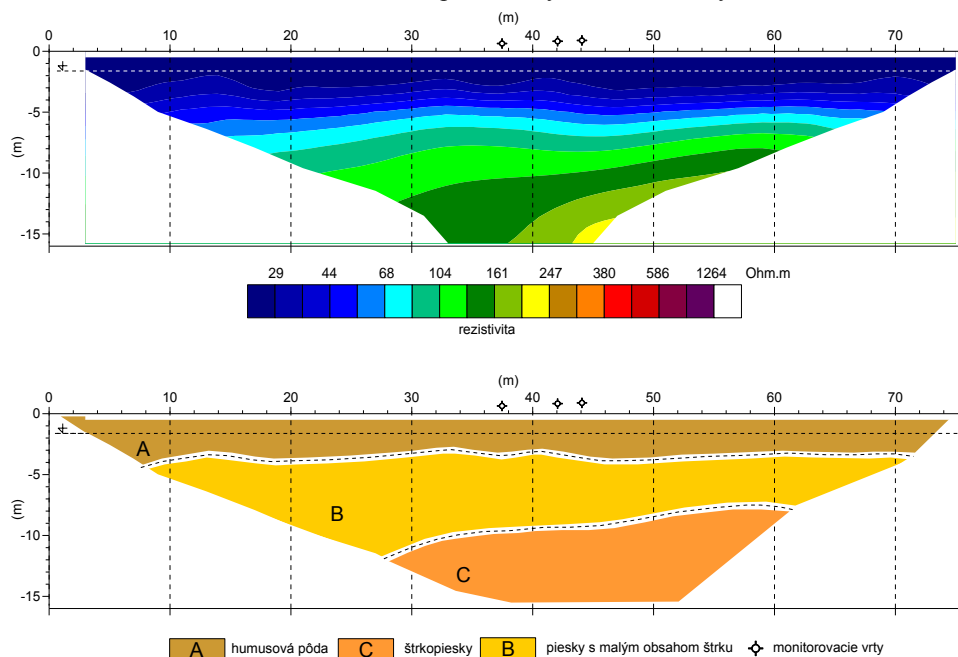
kde γ_d je vodivosť horninového prostredia, A je všeobecná konštanta, γ_w je vodivosť pórovej tekutiny, Φ je pórovitosť, S_w je nasýtenie vodou, m je faktor tvaru častíc, n je empirická konštanta a zvyčajne sa kladie rovná 2, γ_c je vodivosť ílovej zložky zemín (charakterizuje povrchovú vodivosť ílových minerálov prítomných vo vyšetrovanom prostredí). Parameter m , resp. voľba jeho hodnoty má neukončenú históriu a v súčasnosti je aktuálny vzťah, ktorý na základe empirických údajov publikovali Sen a kol. (1988)

$$m = 1,67 + 1,953 (CEC/100)^{1/2}$$

kde CEC je hodnota výmennej kapacity kationov a jej hodnota sa pohybuje od 5 (meq/100 g) pre jemné štrky po 500 (meq/100 g) pre čistý íl. Parameter CEC takto zavádza hodnotenie prítomnosti ílov aj do exponenta pórovitosti.

Interpretácia výsledkov merania metódou ERT

Rezistivné rezy zostavujeme v prevažnej miere z výsledkov meraní metódou VES a ERT. Z týchto dvoch metód najväčšiu hustotu informácie poskytuje metóda ERT. Preto v ďalšom budeme diskutovať interpretáciu výsledkov získaných touto metódou.

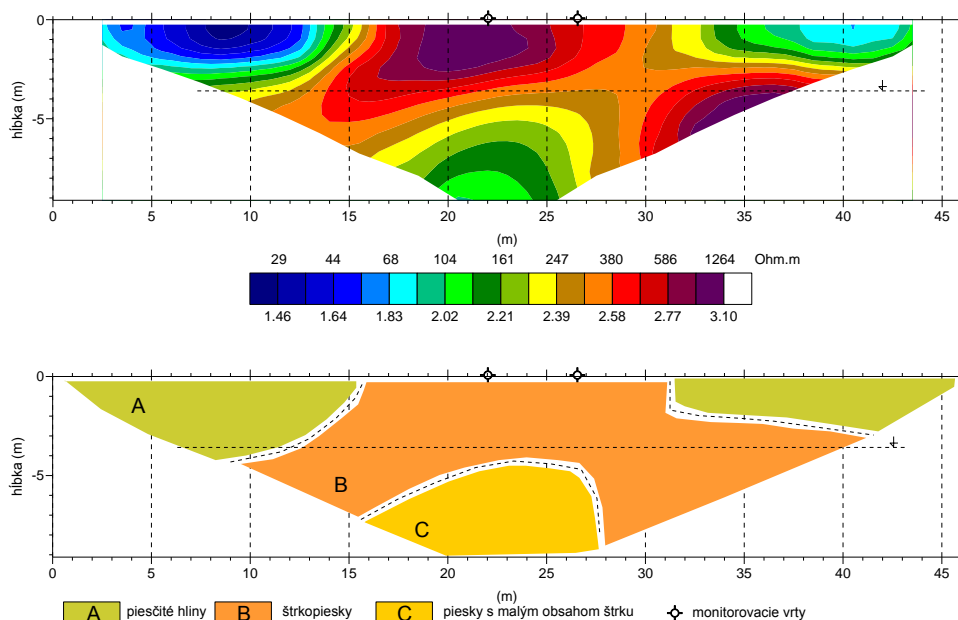


Obr.3 Výsledok merania na hydrologickom monitorovacom stanovišti Čilízska Radvaň.

Ako uvádzame v predošlej časti, na jednej strane máme k dispozícii možnosť zostaviť pomocou teoretických predpokladov približný model rezistivného obrazu nenasýteného horninového prostredia, na druhej strane stojí realita charakterizovaná veľkou lokálnou premenlivosťou materiálového zloženia, pórového priestoru a jeho nasýtenia rôzne mineralizovanou vlhkosťou. Prax však ukazuje, že je možné zmierniť túto neurčitosť obrátenej úlohy a z reálnych výsledkov zostaviť modely, ktoré budú mať svoju akceptovateľnú výpovednú hodnotu. Vzhľadom na obmedzený priestor a zložitú situáciu si na tomto mieste dovoľíme načrtnúť možné východiská.

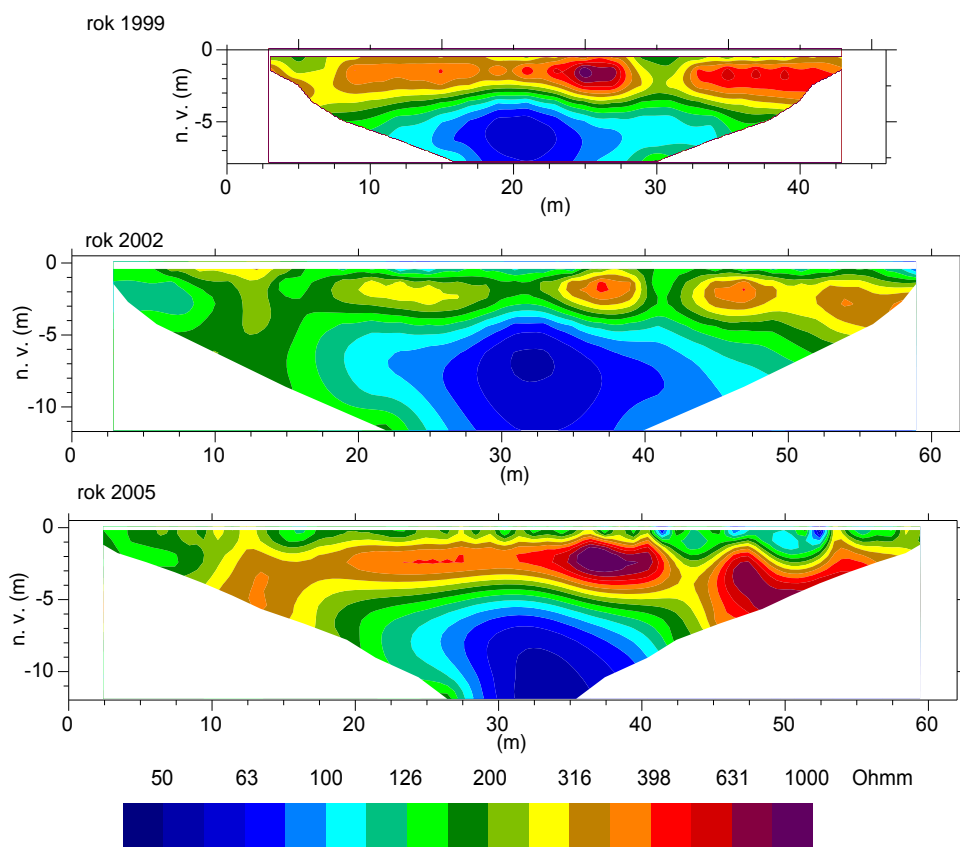
Na obr.3 a 4 sú uvedené vertikálne rezy ako výsledok inverzného spracovania nameraných dát metódou ERT a ich materiálovej interpretácie. Zároveň sú v rezoch vyznačené polohy hladiny podzemnej vody. V obr.3 je hladina plytko a teda nenasýtená zóna je veľmi tenká (cez 1,5 m). V reze na obr.4 je zase hladina podzemnej vody hlbšie a nenasýtená zóna je tu pomerne hrubá (viac ako 3 m).

Rez na obr.3 je jednoduchý, tvoria ho subhorizontálne vrstvy pôdy, pod ňou ležia piesky s malým obsahom štrku a pod nimi ležia štrky (sú to kvartérne uloženiny Žitného ostrova). Nenasýtená zóna nevykazuje žiadne výrazné charakteristiky, ktoré by ju odlišovali od nasýtenej zóny a pokiaľ by sme nemali údaje z vrtu, nedala by sa poloha hladiny podzemnej vody z uvedeného rezu určiť. O nenasýtenej zóne sa v tomto prípade dá povedať, že je homogénna, vlhkosť je rozdelená rovnomerne a nevytvára anomálne miesta. Všetky zložky prostredia, pórový priestor, jeho nasýtenie a mineralizácia vlhkosti ako aj podzemnej vody nevykazujú zjavné zmeny. Narastanie odporu smerom do hĺbky je tu zrejme regulované predovšetkým narastaním podielu piesčitej až štrkovej zložky a ubúdaním jemnozrnnej humusovej zložky s hĺbkou.



Obr.4 Výsledok merania na hydrologickom monitorovacom stanovišti Báč.

Rez na obr.4 je zložitejší. Materiálové zloženie je pestréjšie (striedanie štrkov, piesku a piesčitej hliny), hladina podzemnej vody je hlbšia a teda nenasýtená zóna je hrubšia (cez 3 m). Čo je dôležité, hladina podzemnej vody v reze nevytvára významné rozhranie a prechody medzi jednotlivými objektmi sú plynulé bez zjavných deformácií. Z rezu sa dá usudzovať, že je štrukturovaný predovšetkým zmenou materiálového zloženia – striedaním štrkov, pieskov a piesčitých hĺn. Tieto materiály vymedzujú rozdelenie pórového priestoru a tým aj rozdelenie vlhkosti nenasýtenej zóny. Čo je zvlášť dôležité, samotná zmena vlhkosti nevytvára samostatné telesá – štrky z nenasýtenej zóny prechádzajú do nasýtenej zóny bez viditeľného skoku a rovnako piesčité polohy nevykazujú rozdielny charakter v nasýtenej a nenasýtenej zóne. Z uvedeného vyplýva, že zmena pórovitosti a jej nasýtenia vodou úzko súvisí s litologickým charakterom prítomných zemín a v tomto prípade, keď nie sú v mieste merania a ani jeho okolí známe zdroje zvýšenej mineralizácie, je rozdelenie vlhkosti v nenasýtenej zóne v zhode s litologickým charakterom zemín a nemení ich rezistivný obraz v prezentovanom reze. Tento poznatok je možné zovšeobecniť tak, že v prípade pestrého zloženia horninového prostredia v nenasýtenej zóne, keď je zastúpená väčšina zrnitostných zložiek, tak rozdelenie vlhkosti nemusí významnejšie deformovať jeho rezistivný obraz.



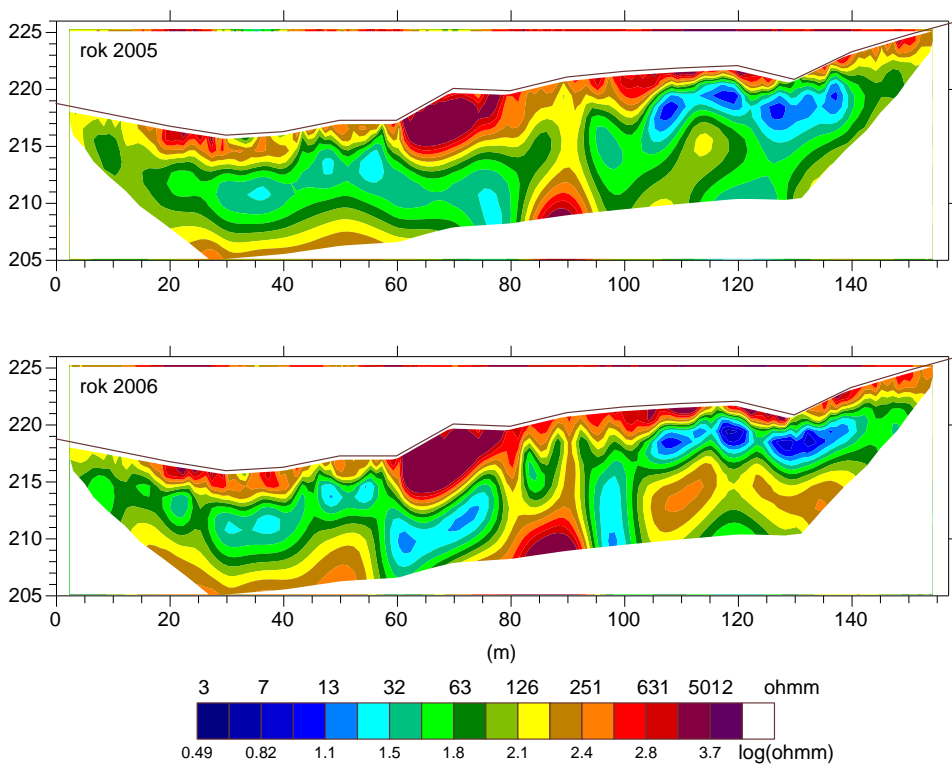
Obr.5 Opakované meranie na odkalisku popolovín

Extrémnym prostredím umelých zemín sú odkaliská popolovín. Na obr.5 sú výsledky opakovaných meraní na takomto odkalisku. Pri povrchu je poloha pokryvných hĺn, ktorá umožňuje konduktívne meranie, pretože je tu dosť hlinitej zeminy na zabezpečenie dostatočne nízkeho prechodového odporu na meracích elektródach. Pod ňou je vrstva suchého popola, vytvárajúca nenasýtenú zónu, v ktorej je prítomná vlhkosť iba v čase zrážok. Rezistivita tejto vrstvy sa v čase mení a závisí na zrážkovej aktivite bezprostredne predchádzajúcej realizáciu merania. V spodnej strednej časti rezu je oblasť s nízkou rezistivitou predstavujúca priestor nasýtený podzemnou vodou, ktorá tu odvodňuje teleso odkaliska.

Nakoniec by sme chceli ukázať situáciu s príkladom nenasýtenej zóny v skalných horninách (obr.6). Sú to výsledky monitorovacích meraní vykonaných pod skládkou vybudovanou v bývalom kameňolome (vápence) položenom nad prístupovou cestou, takže meranie bolo možné realizovať na svahu pod kameňolomom. Z množstva opakovaných meraní tu uvádzame dva charakteristické rezistivné rezy, zhodou okolností merané v dvoch po sebe idúcich rokoch. Z rezov je zrejmé, že pri povrchu je vrstva skalných hornín a to vo forme hrubej vrstvy navážky balvanov rôznej veľkosti. Pod ňou je vrstva jemnozrnnejších zemín. Pod ňou vo forme kúl vystupuje skalné podložie, ktoré je zhruba po metráž 60 m kompaktné, vo vyšších metrážach je diferencované a obsahuje strmé polohy so zvýšenou pórovitosťou a nevylučuje sa ani prítomnosť krasových javov. Oba rezy dokumentujú premenlivosť rezistivného obrazu hlavne na rozhraní medzi vrstvou jemnozrnnejších zemín a skalným podložíom. Za príčinu tejto premenlivosti považujeme meniaci sa obsah vlhkosti dodávanej zo zrážok a tiež zo zakonzervovaného telesa skládky, ktoré leží nad meraným profilom a funguje ako špongia, ktorá postupne uvoľňuje vlhkosť do meraného priestoru. Pozorované zmeny sú teda výsledkom zrážkovej aktivity v období bezprostredne pred realizovaným meraním a za prispenia retenčnej schopnosti telesa skládky v susedstve meraného profilu. Z rezov je tiež zrejmé, že zeminy nad a skalným podložíom a v jeho poruchách sú pomerne priepustné a obsah vlhkosti v nich je citlivý na dotáciu vody zo zrážok.

Záver

Na základe priebežne získavaných poznatkov sa ukazuje, že interpretácia rezistivných rezov získaných inverziou z meraní metódou ERT v prostredí bežných zemín nie je, okrem tenkej vrstvy pri povrchu, významne ovplyvnená prítomnosťou vlhkosti, pretože premenlivosť jej obsahu (S_w) je v zhode s pórovitosťou konkrétneho typu zeminy vrátane prítomnosti ílových minerálov. Extrémnym prípadom sú hrubozrné zeminy s rovnakou zrnitosťou bez ílov (piesok, popoloviny, štrky a pod.), v ktoré sa (pod tenkou povrchovou vrstvou s malým obsahom hĺn a zvyškov vegetácie) v suchom období výrazne odvodňujú, takže prítomnosť vlhkosti a teda aj jej vplyv na rezistivný obraz nenasýtenej zóny je významný. Podobne v prostredí so skalným podložíom, tvoreným karbonátmi, môžu byť prítomné krasové dutiny vyplnené ľahko priepustným (veľké zrná) materiálom v ktorom je obsah vlhkosti silne závislý na zrážkovej aktivite a rezistivný obraz týmto významne ovplyvnený. V takýchto prípadoch odporúčame pre kvalitnejšiu interpretáciu realizovať opakované meranie v zrážkovo rozdielnych pomeroch.



Obr.6 Príklad nenasýtenej zóny v prostredí so skalnými horninami.

Príspevok vznikol s podporou grantovej agentúry VEGA prostredníctvom projektov č. 1/4041/07 a 1/3073/06 a tiež projektu č. APVV-0158-06, podporovaného agentúrou APVV.

Literatúra

- [1] Mareš, S. et al. (1980): Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii. SNTL/ALFA, Praha.
- [2] McNeil, J.D. (1980): Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-5. Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canada.
- [3] Sen, P.N. et al. (1988): Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. J. Appl. Phys., 63, 4832-4840.